

Transferencia de esfuerzos estáticos de Coulomb, factor clave en la tectónica y la peligrosidad sísmica en Centroamérica

J.A. Álvarez-Gómez¹, J.J. Martínez-Díaz¹ y B. Benito²

¹ Dpto. de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, c/ José Antonio Novais s/n, 28040 Madrid. jaalvare@geo.ucm.es, jmdiaz@geo.ucm.es

² I.E.U.T. Topografía, Universidad Politécnica de Madrid, 28031 Madrid.

ABSTRACT

In this work we show how the occurrence of some earthquakes can highly contribute to the seismic and tectonic pattern development of entire regions applying the stress transfer model. This paper focuses on northern Central America and particularly on a representative zone which has suffered the consequences of the earthquake triggering phenomenon recently. This zone is El Salvador, a very active area from the geological point of view. At the beginning of 2001 two earthquakes shook the country provoking one of the biggest disasters of the last decades. The first earthquake took place within the subducting slab and the second one took place in the El Salvador Fault Zone (ESFZ). This fact led us to study the relation between the two main events and how the former could trigger the latter. In the 80's such a thing happened too: An Ms 7.3 earthquake took place within the subducting slab in 1982, and in 1986 another earthquake took place in the El Salvador Fault Zone. We argue that the tectonic configuration of the zone determines the occurrence of these coupled events, and conversely, the occurrence of those promotes the development of this tectonic configuration.

Key words: seismic triggering, seismic hazard, stress transfer, active tectonics, Central America.

INTRODUCCIÓN

El modelo de transferencia de esfuerzos estáticos utiliza el criterio de rotura de la mecánica de rocas de Navier-Coulomb para calcular patrones espaciales de variación de esfuerzos estáticos. El desarrollo para su aplicación a la interacción entre fallas ha sido realizado por Okada (1992). Este modelado utiliza el movimiento de cada falla en un espacio elástico semiinfinito para calcular la variación de los esfuerzos sobre un plano determinado. Esta variación de esfuerzos (ΔCFS) viene determinada por: $\Delta CFS = \mu' \Delta \sigma$, donde $\Delta \tau$ es la variación del esfuerzo de cizalla (positivo a favor de la dirección de cabeceo de la falla), $\Delta \sigma$ es la variación del esfuerzo normal al plano de falla (tomando como positivo el esfuerzo compresivo sobre el plano) y μ' es el coeficiente de fricción efectivo. En los últimos años este modelo está siendo utilizado para evaluar la peligrosidad sísmica teniendo en cuenta las interacciones entre fallas y sus implicaciones en la tectónica (Harris, 1998). En este trabajo mostramos la importancia de estas interacciones en el norte de Centroamérica, y en detalle las implicaciones de la serie sísmica de 2001 de El Salvador. El 13 de Enero de 2001 un terremoto de magnitud Mw 7.7 tuvo lugar en la placa de Cocos, en su subducción bajo la placa del Caribe, a una profundidad de unos 55 km. Un mes después, el 13 de Febrero, otro terremoto tuvo lugar; éste ocurrió en la Zona de Falla de

El Salvador (Martínez-Díaz *et al.*, 2004) (Fig. 1), con una magnitud de 6.6 Mw. Esta serie sísmica fue estudiada desde el punto de vista del encadenamiento de terremotos por transferencia de esfuerzos por Martínez-Díaz *et al.* (2004). Estos autores además describen en el mismo trabajo otra serie sísmica con características muy similares ocurrida entre los años 1982 y 1986. En el trabajo aquí presentado desarrollamos desde el punto de vista tectónico las condiciones que se dan en esta región en concreto para el desarrollo de estas series sísmicas. Además es destacable la implicación sobre la peligrosidad sísmica de la configuración tectónica aquí descrita junto con el fenómeno de la transferencia de esfuerzos estáticos de Coulomb.

CONTEXTO TECTÓNICO

El área de estudio se encuentra en el norte de Centroamérica. Comprende la región de Chiapas, al sur de México, Belice, Guatemala, Honduras, El Salvador, Nicaragua y el extremo norte de Costa Rica. Geológicamente la zona se sitúa en un límite activo de placas litosféricas. La placa de Cocos subduce bajo la placa del Caribe, adoptando un ángulo de subducción muy alto. Además de este límite de placas también se encuentra en esta área el límite con la placa de Norte América, dando lugar a un punto triple de tipo TTF *sensu lato*. El límite entre las placas de Norte

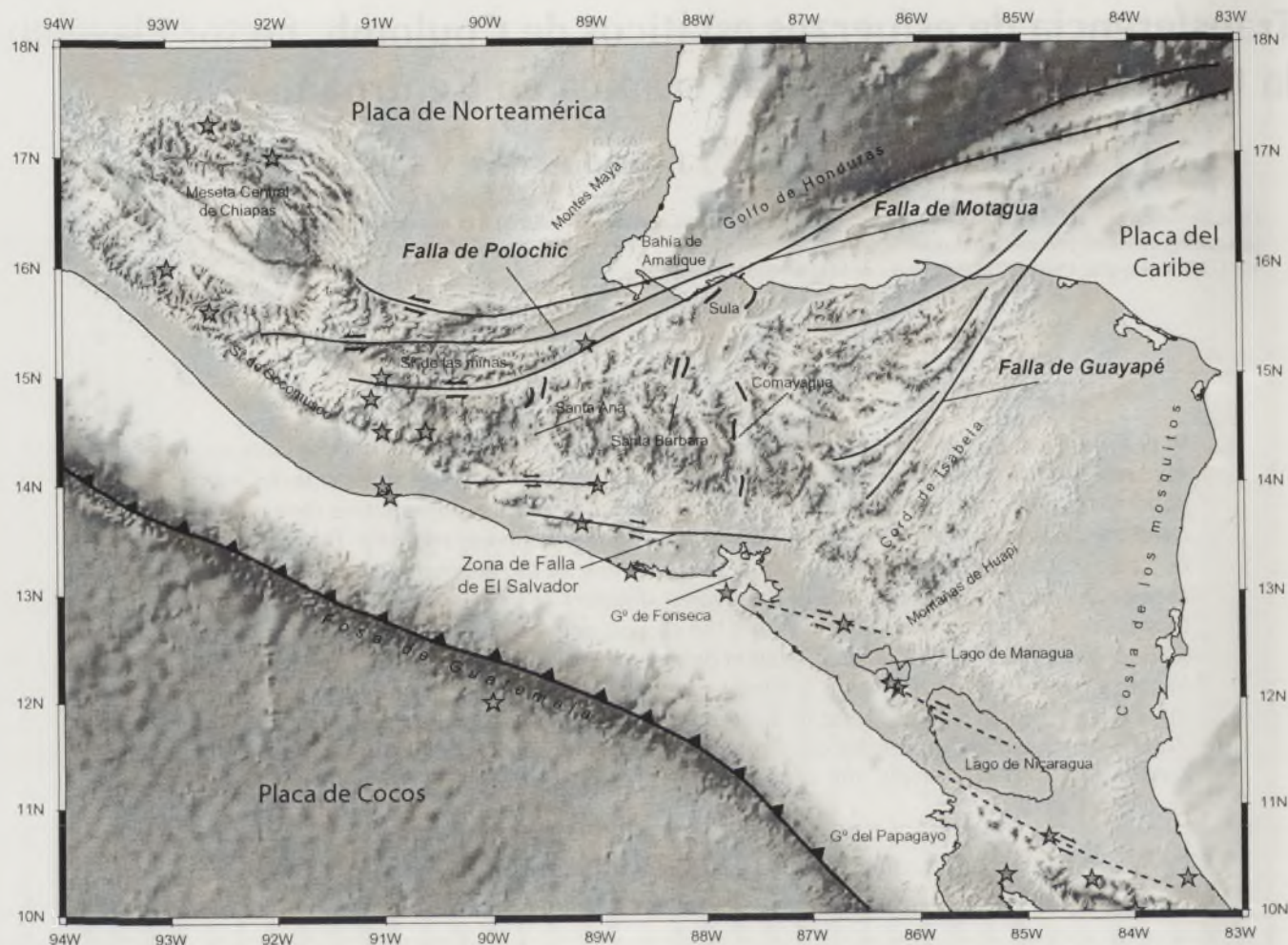


FIGURA 1. Configuración tectónica del norte de Centroamérica. Se indican con flechas las direcciones de movimiento de las principales fallas de desgarre. Con línea discontinua se marcan las fallas de desgarre interpretadas a partir de la configuración sismotectónica. Con líneas dentadas se delimitan los mayores grabens de la zona. La línea con triángulos marca el surco del límite de placas litosféricas en subducción. Las estrellas marcan los epicentros estimados de los terremotos históricos (1900-1976, fuente: NEIC, 2004).

América y Caribe se resuelve en el continente en una zona de cizalla donde las principales estructuras tectónicas son las fallas de Polochic y Motagua (Fig. 1). Otra importante zona de cizalla, también asociada al límite de placas anterior, es la de la Falla de Guayapé. Este es un importante accidente tectónico que, sin embargo, en la actualidad no presenta actividad sísmica importante. Entre estas dos zonas de cizalla se encuentran una serie de grabens de dirección N-S que han sido explicados como resultado de un régimen extensional presente en la zona debido al movimiento de la placa del Caribe con respecto a la Norteamericana (Guzmán-Speziale, 2001). En la costa sur esta zona se caracteriza por presentar una serie de fallas de desgarre dextrorsas, cuya dirección es aproximadamente 10 grados menor que la del surco, y cuya función es la de acomodar el movimiento paralelo al límite con la placa de Cocos. A este fenómeno de separación de movimiento en dos vectores de magnitudes y dirección diferentes se le ha llamado "strain partitioning", descrito por Harlow y White (1985). A esta familia de zonas de desgarre pertenece la

Zona de Falla de El Salvador, que junto con otras zonas de falla similares orlan la costa sur del norte de Centroamérica y son las responsables de la gran mayoría de terremotos destructivos históricos en la zona (Fig. 1).

Clásicamente las zonas de subducción oblicuas se caracterizan por presentar un arco volcánico relativamente alejado del surco. Presentan además una zona asísmica entre el surco y el arco volcánico que es limitada antes del arco por una zona de cizalla que acomoda el desplazamiento oblicuo de la placa que subduce. En el caso centroamericano el ángulo con que penetra la placa de Cocos bajo la del Caribe es tan alto que el vulcanismo que se genera tiene lugar a una distancia relativamente corta del surco. La zona de cizalla está representada en Centroamérica por las zonas de falla de desgarre antes mencionadas, que limitan por el norte, en nuestro caso, al arco volcánico. El movimiento dextrorso de esta zona de cizalla junto con el movimiento sinistrorso de la zona de falla de Motagua-Polochic, hacen que exista un bloque en escape que en su movimiento hacia el este genera los grabens de dirección N-S (Fig. 1).

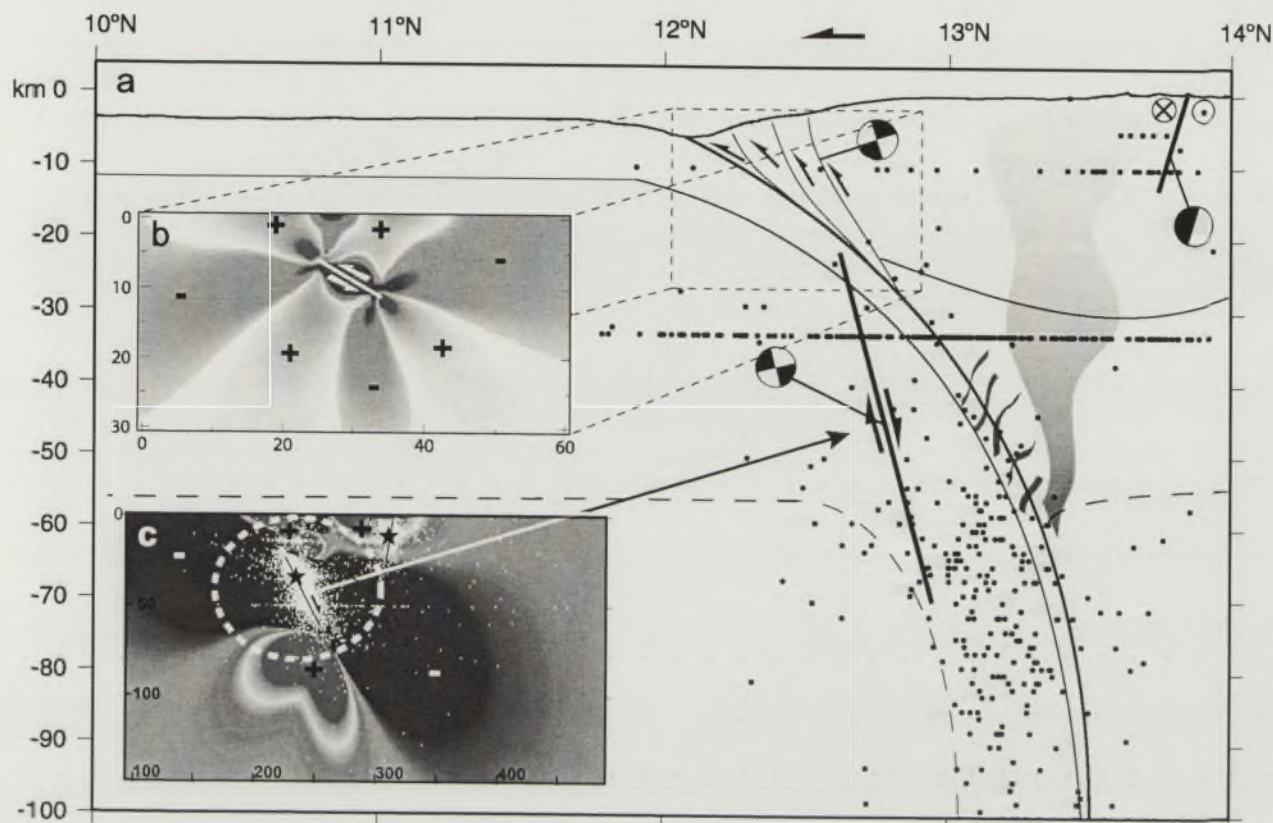


FIGURA 2. a) Corte esquemático de la zona de subducción centroamericana en el sector de El Salvador. Se marcan los mecanismos focales en corte de cada familia de fallas tratadas en el texto así como su movimiento. La línea del extremo derecho representa la Zona de Falla de El Salvador. El área sombreada representa la zona de ascenso de magmas que dan lugar al arco volcánico. Los puntos representan los hipocentros del catálogo sísmico del NEIC, y abarcan magnitudes de 2.8 a 7.8, desde 1976 a 2003. b) Modelo de transferencia de esfuerzos de Lin y Stein (2004) para fallas inversas, las partes oscuras representan zonas donde las fallas de desgarre son inhibidas, es decir se alejan de la rotura. Las partes claras donde las fallas de desgarre son promovidas. c) Modelo de transferencia de esfuerzos de Martínez-Díaz et al. (2004) para el terremoto de falla normal de Enero de 2001 en El Salvador. El sombreado sigue las mismas pautas que el anterior.

DISCUSIÓN

Podemos distinguir en esta zona tres fuentes de sismicidad principales. En el surco la sismicidad se asocia a movimientos de falla inversa; en la placa que subduce ocurren terremotos asociados a grandes fallas normales por la flexión de la placa y el tirón de ésta al subducir; y asociados a la zona de desgarre ocurren terremotos con componente principal dextrorsa (Fig. 2a). Según el modelo de Lin y Stein (2004) (Fig. 2b) los terremotos de falla inversa inhibirían el movimiento de las fallas de desgarre en la zona inmediatamente postero-superior a la falla. Sin embargo, según el modelo de Martínez-Díaz et al. (2004) los terremotos de falla normal asociados a la placa al subducir (Fig. 2c) generan un aumento de τ_{CFS} en la zona antero-superior a la falla que acercan a la de desgarre a su rotura y por tanto facilitan su movimiento y generación. Este hecho nos lleva a argumentar que si bien la existencia de estas fallas de desgarre se debe a la necesidad de acomodar movimientos paralelos al surco, su posición y orientación además están condicionadas por la variación de esfuerzos generada con cada terremoto de

mecanismo focal normal que ocurre en la placa que subduce. Las fallas de desgarre en superficie serían un reflejo de la morfología en profundidad de la placa al subducir, que probablemente se encuentre alabeada e incluso rota en segmentos a cierta profundidad debido al alto ángulo con que esta subduce (Moore y Twiss, 1997).

CONCLUSIONES

Como ha sido demostrado, existe una relación de causalidad entre los terremotos que ocurren en la placa que subduce y los que ocurren en la zona de desgarre. Son estos grandes terremotos de falla normal los que inducen tal aumento de τ_{CFS} que llevan a las fallas del continente cerca de su rotura y por tanto aceleran la ocurrencia de terremotos en esta zona. Como se vio en las series sísmicas de El Salvador de 1982-1986 y 2001 (Martínez-Díaz et al. 2004) la importancia de este fenómeno es clave, ya que los grandes terremotos destructivos de la zona están asociados a estas fallas dextrorsas (Fig. 1).

Es importante en la evaluación de la peligrosidad sísmica tener en cuenta este tipo de procesos. Éstos pueden

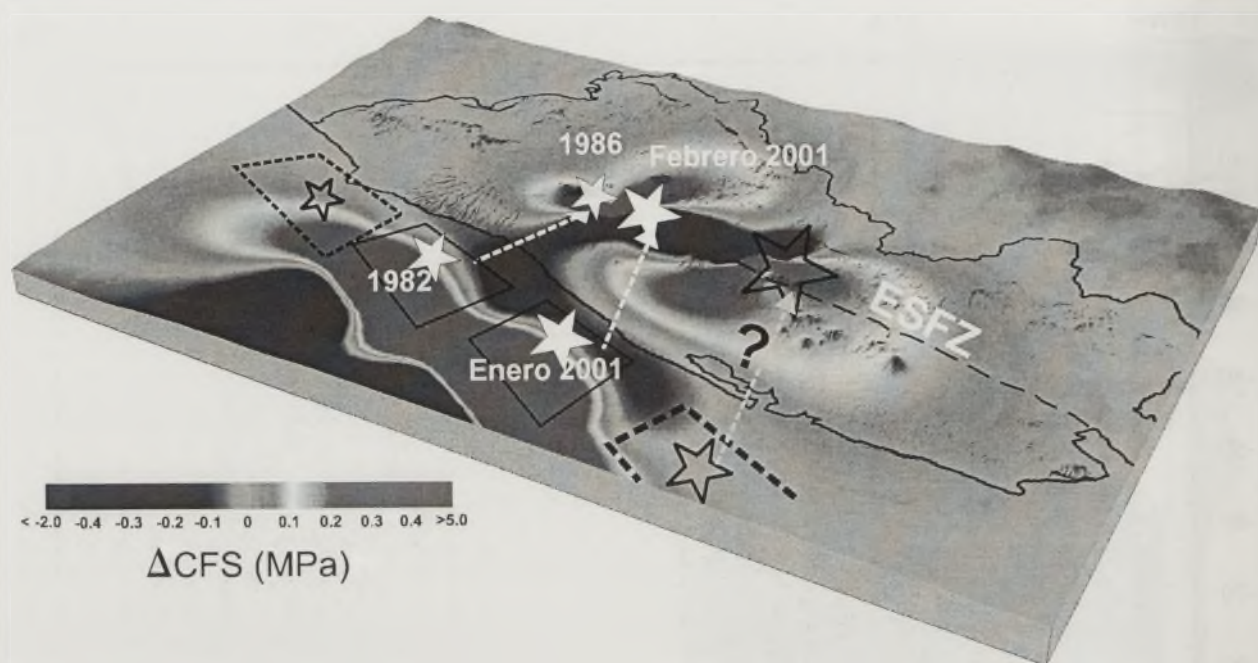


FIGURA 3. Modelo de transferencia de esfuerzos acumulado de las series sísmicas de El Salvador de 1982-1986 y 2001. El sombreado representa la variación de esfuerzos sobre planos de falla con la dirección y el buzamiento de la Zona de Falla de El Salvador (ESFZ). Se representa el lugar hipotético de una probable futura serie sísmica de acuerdo con el modelo.

determinar en mayor o menor medida el lugar de ocurrencia del próximo terremoto (Fig. 3) y/o el intervalo de tiempo temporal entre uno y otro. Por lo tanto, un estudio preliminar de las interacciones entre fallas y terremotos ayuda a acotar las zonas de mayor probabilidad de ocurrencia de eventos conocida la historia reciente de las fallas en juego.

AGRADECIMIENTOS

J.A.A.G. disfruta de una beca predoctoral de la Universidad Complutense de Madrid. Gracias a C. de Ignacio por sus revisiones y comprensión. Gracias a R. Capote por su apoyo a mis labores de investigación. Parte de las figuras ha sido realizada con el software GMT.

REFERENCIAS

- Guzmán-Speziale, M. (2001): Active seismic deformation in the grabens of northern Central America and its relationship to the relative motion of the North America-Caribbean plate boundary. *Tectonophysics*, 337: 39-51.
- Harlow, D.H. y White, R.A. (1985): Shallow earthquakes along the volcanic chain in Central America: Evidence for oblique subduction. *Earthquake Notes*, 55: 28.
- Harris, R.A. (1998): Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. *Journal of Geophysical Research*, 103: 347-358.
- Lin, J. y Stein, R.S. (2004): Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults. *Journal of Geophysical Research*, 109: B02303, doi:10.1029/2003JB002607.
- Martínez-Díaz, J.J., Álvarez-Gómez, J.A., Benito, B. y Hernández, D. (2004): Triggering of destructive earthquakes in El Salvador. *Geology*, 32: 65-68.
- Moore, E.M. y Twiss, R.J. (1997): Models of subduction zone processes. En: *Tectonics*. Ed. W.H. Freeman and Company. New York. 415 p.
- National Earthquake Information Center, NEIC. (2004): Data Base: Mexico, Central America, Caribbean, 1900-1979. http://neic.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html
- Okada, Y. (1992): Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82: 1018-1040.